

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06083

研究課題名(和文)空間位置情報を用いた電波伝搬推定とその可視化に関する研究

研究課題名(英文)A study on radio wave propagation estimation and its visualization using spatial location information

研究代表者

白井 宏 (Shirai, Hiroshi)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：00196594

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、大都市空間における高速かつ高品質な情報通信サービスの提供に向けて、複雑な建造物の空間位置情報を効率的に組み込むことによって、電波伝搬の予測を高速に行い、その予測結果をわかりやすく可視化して表示するシステムの構築を目的とした。幾何光学的な光線追跡手法を用いて、建物外部の電波伝搬の解析のみならず、建物内部から外部へ、あるいは外部から内部へ透過する電波伝搬を高速に解析し、その結果を可視化する手法を検討した。その解析手法の妥当性を検証するために、室内や屋外の伝搬測定との比較も行い、有効な手法であることが示された。

研究成果の概要(英文)：Appropriate installment of wireless base station plays an important role for supporting a recent growth of high speed mobile communications. In order to realize such communication system, one needs fast and accurate radio wave propagation estimation method. In this investigation, shooting and bouncing rays (SBR) algorithm has been proposed to analyze the radio wave propagation. For high frequency regime, waves can be regarded as rays and the multiple reflections and transmissions at the building walls have been treated effectively and the field strength can be visualized in a map, so that one can easily observe and analyze the field distribution.

研究分野：電磁波工学

キーワード：移動体通信 電波伝搬推定 アンテナ 光線追跡法 GTD 幾何光学的回折理論

1. 研究開始当初の背景

携帯電話や無線 LAN 等による移動通信が盛んになるにつれ、我々の生活環境の中には電波があふれ、それに伴って使用周波数の逼迫、他システムとの混信や干渉、ならびに人体の影響を含めた環境問題等の社会問題も起きている。こうした無線通信システムの設計・構築において、その使用周波数に応じた電波伝搬の特性を調べることは、いわゆる「不感地帯」をなくし効率のよい通信サービスを提供するために重要な要素となっている。

電波の伝搬は、その伝搬路付近の自然地形や人工建造物の影響を大きく受ける。そのため、通信障害の予測、あるいは生活環境における電波の強度分布推定には詳細な地理情報も必要となり、都市部における電波伝搬環境は、高層建築物の影響を受けて、ますます複雑なものになってきている[引用文献 ①, ②]。

特に高層ビルの内外で用いられる高速無線 LAN ネットワークシステムや種々の情報・サービスを統合した近未来のユビキタスネットワークの設計には、従来の平面的な通信回路設計手法をそのまま適用して解析できないので、ビルの多層構造や通信機器の位置関係を考慮した立体的な空間位置情報を基にした通信伝搬解析が必要となる。

近年、情報通信の高度化、大容量化に伴い、使用周波数が高くなり、波長が散乱体に対して相対的に小さくなると、以前にも増して物体の局所構造が電波の伝搬に強く影響するようになり、電磁界強度分布の予測は難しくなっている。安定した通信チャネルを確保し、移動体通信の不感地帯を減らすことは重要であるけれども、そのための不必要な過度の電波放射は、周りの生活環境や人体への影響も懸念されるため避けるべきである。加えて情報通信セキュリティ上からも不必要な場所への電波漏えいは、避けるべきであり、今後は効率がよくかつ安全な無線通信基地局の配置が望まれる。

2. 研究の目的

本研究では、建物外部、あるいは建物内部における電波伝搬の推定に関する申請者らによる今までの研究の成果を生かし、建物や基地局等の空間位置情報と建築材料の電気定数の情報をもとに、統合的な電波伝搬推定を行い、その結果を可視化する。複雑な都市環境や室内環境をモデルとした電波伝搬を解析するときには、有限要素法などの数値解法も考えられるが、使用周波数が高いと、細部にわたる標本点を抽出する必要がある。その結果として大容量の記憶容量を確保しなければならなくなり、効率のよい解析は期待できない。そこで本研究では、数値解法と相補的な立場にある光線理論に基づいた高周波近似解析法を用いる[引用文献 ③]。

電波の伝搬強度の計算は、通常観測点を決めて、その点に到達する電波を見つけて、その強度を計算する。この場合、観測点を換え

るたびに、すべての計算を繰り返さなくてはならないので効率的でなく、ある地域全体の電波強度分布を計算するには適さない。そこで、ある空間に伝搬する通信基地局アンテナからの電波の放射を想定し、その都度その点の電波強度を追加記憶していくことで、一度の計算によりすべての情報を蓄えることができ、計算時間を大幅に短縮できることになる(図1参照)。この光線理論は、光線追跡法等のコンピュータグラフィックスの可視化の技術と類似しているため、そうした技術と連携して画像表示も工夫することができる。

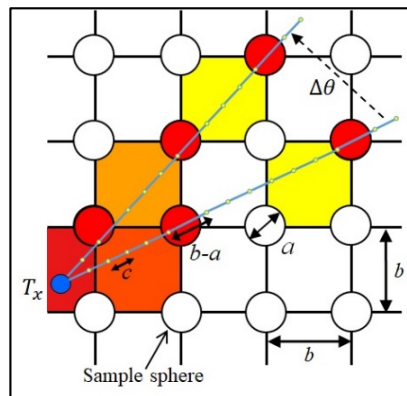


図1：光線追跡法による解析と可視化

3. 研究の方法

都市空間や建物内の電波伝搬特性を光線理論で解析する上で一番重要なのは、建築物の壁等による多重反射および透過・回折の問題である。反射波は、可視領域の伝搬に大きな影響を与え、直接波との干渉により、基地局が直接見えている場合でも信号強度が弱くなることもある。透過波は、壁を通した屋内通信や建物外から透過した電波を用いた通信のために、また回折波は、高層建築物の陰となる領域で重要な成分となり、いずれも電波強度は弱いけれども通信に必要な波となりうる。電波の反射・透過量は、その建造物のビル壁の材質、表面等で変化し、また周波数分散性があるので、周波数によっても、また入射角によっても反射、透過率が変化する。都市部の高層建築物の主要部材は、そのほとんどが、鉄筋コンクリートであり、建物内のフロアプランのための間仕切り壁もコンクリート、合板木材やパネル等でできている。こうした壁材等は、移動体通信に用いる高周波の電波に対して、損失誘電体と考えることができる。

電波伝搬を推定したい空間における建物等の配置や構造情報をデータベースとして計算機に取り組み、基地局から放射された電波を光線とみなして、その電波を逐次追跡し、建物の壁等の散乱体に当たった場合には、反射する反射波や回折波ならびに内部へ透過する透過波を新たに追跡するアルゴリズムを考える。電波はこうした散乱過程を繰り返して減衰していくが、理論的には無限個の波の和となる。そこで効率のよい解析のためには、それぞれの散乱過程において、主なる寄与を与

える成分を選択して計算する必要がある。またその結果の妥当性を確かめるためには、他の解析法による結果との比較や測定実験も必要となる。こうして効率の良い伝搬解析アルゴリズムを考案し、その結果を高速に可視化する方法を考える。

4. 研究成果

申請者らによるこれまでの研究では、屋外の伝搬や建物内の無線LAN 基地局等からの見通し伝搬を主に考えていたので、壁材の損失により内部透過の影響は少ないとして、建物壁による多重反射を考えていた。しかし比較的薄いパネル材などについては、材質内の透過量も多く、壁内の多重反射や多重透過の効果の検討も必要となることを示されている。多層空間内での伝搬、あるいは屋外から屋内への透過の場合には、天井、床、壁、窓を透過した伝搬が主となることから建築材料の内部構造や厚さを把握し、それらの電気定数を測定することによって伝搬量を推定することになる。高速の無線通信の場合には、直接届く波に対して、多重反射・透過することにより遅延して到達する波の影響を知ることが重要であり、それらをすべて合成した波として伝搬損を推定するのではなく、遅延も考えた伝搬状況を知る必要がある。

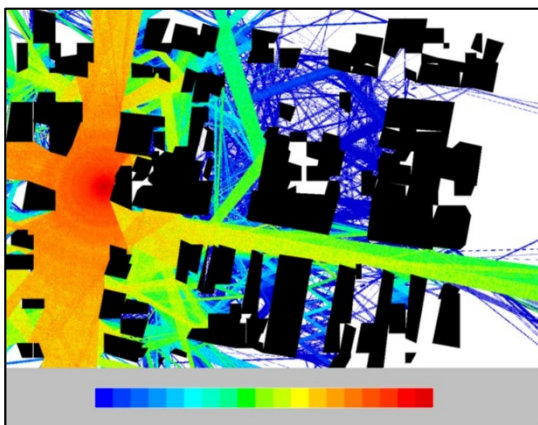


図2：屋外の電波伝搬の可視化

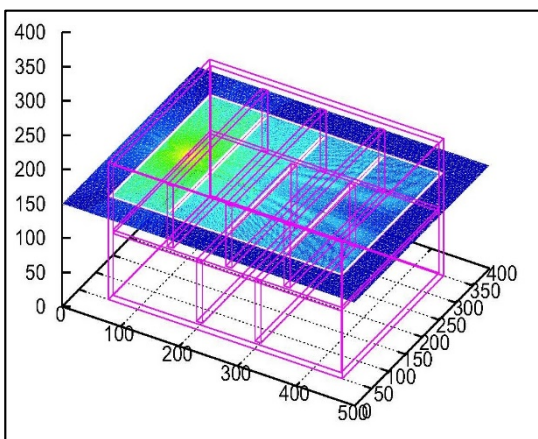


図3：屋内の電波伝搬の可視化

特に建物内を伝搬する波を追跡するためには、内部壁の厚みやその材質の影響を考えて追跡するため、計算に時間がかかる。したがって高速に解析するためには、壁材の電気的な等価媒質定数を求める必要がある。そこで壁材となる誘電体材料からの反射波からの等価媒質係数の算出法や内部を多重反射して透過する寄与の強度も検討した。

建物外にある基地局と建物内にいる加入者が通信する場合を想定すると、主要な通信経路は、建物の壁に開けられた窓となることを想定して、その透過量の解析を行った。窓開口だけの場合や窓の取り付けられた窓ガラスの厚みやガラスの誘電率の影響も検討することができた。

加えて測定実験に使用できるような広帯域で小型なアンテナについても検討し、波長に比べて小型であっても放射効率の高いアンテナや複数の使用周波数帯域を考慮した小型アンテナを提案することもできた。これらのアンテナは、今後の測定実験のために役立つものであり、他の用途にも使用可能である。

<引用文献>

- ① H. L. Bertoni, W. Honcharenko, L. R. Maciel, and H. H. Xia, "UHF propagation prediction for wireless personal communications," Proc. of the IEEE, Vol. 82, No. 9, pp. 1333-1359, 1994.
- ② H. L. Bertoni, Radio Propagation for Modern Wireless Systems, Prentice Hall, NJ, USA, 2000.
- ③ M. F. Catedora, J. Perez, F. Saez de Adana, and O. Gutierrez, "Efficient ray-tracing techniques for three dimensional analyses of propagation in mobile communications: application to pico-cell and micro-cell scenarios," IEEE Antennas Propagation Magazine, Vol. 40, No. 2, pp. 15-28, 1998.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 44 件)

- ① A. N. Nguyen and H. Shirai, "Electromagnetic Scattering Analysis from Rectangular Dielectric Cuboids -TE polarization-," IEICE Trans. Electron., 査読有, Vol.E99-C, No.1, pp.11-17, Jan., 2016.
- ② R. Sato and H. Shirai, "Electromagnetic Plane Wave Diffraction by Loaded N-slits on Thick Conducting Screen," IEICE Trans. Electron., 査読有, Vol.E99-C, No.1, pp.72-75, Jan., 2016.
- ③ H. B. Chu, H. Shirai, and D. N. Chien, "New Estimation Method for the Operational Low Frequency End of Antipodal Vivaldi Antennas," IEICE Trans. Electron., 査読有, Vol.E99-C, No. 8, pp.

947-955, Aug., 2016.

④ H. B. Chu and H. Shirai, "Analysis and Design of E-CRLH TL Characteristics with New Closed-Form Solutions," Progress In Electromagnetics Research C, 査読有, Vol. 68, pp.163-178, Oct., 2016.

⑤ H. Shirai, M. Shimizu and R. Sato, "Hybrid Ray-Mode Analysis of E-Polarized Plane Wave Diffraction by a Thick Slit," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 査読有, Vol. 64, No. 11, pp. 4828-4835, Nov., 2016.

⑥ K. Fujita and H. Shirai, "Theoretical Limit of the Radiation Efficiency for Electrically Small Self-Resonant Spherical Surface Antennas," IEICE Trans. Electron., 査読有, Vol. E100-C, No. 1, pp. 20-26, Jan., 2017.

⑦ A. N. Nguyen and H. Shirai, "A Free Space Permittivity Measurement at Microwave Frequencies for Solid Materials," IEICE Trans. Electron., 査読有, Vol. E100-C, No. 1, pp. 52-59, Jan., 2017.

⑧ 清水 将行, 白井 宏, 佐藤 亮一, 「建物壁の窓モデルによる電磁波散乱の解析」, 電子情報通信学会 和文論文誌 C, 査読有, Vol. J100, No. 7, pp. 295-301, 2017.

⑨ H. B. Chu and H. Shirai, "A Compact Metamaterial Quad-band Antenna Based on Asymmetric E-CRLH Unit Cell," Progress In Electromagnetics Research C, 査読有, Vol. 81, pp. 171-179, Feb., 2018.

[学会発表] (計 35 件)

① K. Fujita and H. Shirai, "Theoretical Study on the Radiation Efficiency of Electrically Small and Thin Spherical Shell Antennas," Proc. of the 2015 1st URSI Atlantic Radio Science Conference, CDROM, Gran Canaria, Spain, 2015.

② H. B. Chu and H. Shirai, "Effect of Curvature of Antipodal Structure on Vivaldi Antennas," Proc. of 2015 IEEE AP-S Symposium on Antennas and Propagation, CDROM, Vancouver, Canada, 2015.

③ A. N. Nguyen and H. Shirai, "A Numerical Method for the Estimation of Relative Permittivity of Dielectric Materials," Proc. of 2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, CDROM, Turin, Italy, 2015.

④ H. N. Quang and H. Shirai, "A Compact Triple-Band Metamaterial Antenna for WLAN and WiMAX Applications," Proc. of 2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, CDROM, Turin, Italy, 2015.

⑤ A. Kisumi and H. Shirai, "Dimension Estimation of Polygonal Dielectric

Targets from Surface Reflection RCS," Proc. of International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 386-387, Tasmania, Australia, 2015.

⑥ M. Shimizu, H. Shirai and R. Sato, "Multiple Edge Interaction Effect to Plane Wave Scattering by a Wide and Thick Slit," Proc. of International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 341-343, Tasmania, Australia, 2015.

⑦ H. Shirai and M. Shimizu, "Ray-mode Conversion Technique Applied to Plane Wave Diffraction by a Thick Slit," Proc. of Korea-Japan Joint Conference on EMT/EMC/BE, CDROM, Sendai, Japan, 2015.

⑧ H. Shirai, M. Shimizu, and R. Sato, "Evanescent Modal Effect to E Polarized Plane Wave Diffraction by a Wide and Thick Slit," Proc. of 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 1503-1504, CDROM, Puerto Rico, USA, 2016.

⑨ H. Shirai, M. Shimizu, and R. Sato, "Ray-mode Conversion Technique Applied to Thick Slit Diffraction," Proc. of the 16th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, pp. 43-45, Lviv, Ukraine, 2016.

⑩ H. Shirai, M. Shimizu, and R. Sato, "Diffraction by Thick and Loaded Slit - E-polarization Case-," Proc. of International Symposium on Electromagnetic Theory, pp. 665-667, Espoo, Finland, 2016.

⑪ Z. Zheng and H. Shirai, "Far Field Radiation Pattern Analysis of an Antenna Installed in an Automobile," Proc. of 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, pp. 1038-1041, Seoul, Korea, 2016.

⑫ H. B. Chu and H. Shirai, "Novel Closed-Form Solutions for Designing Extended-Composite Right/Left-Handed Transmission Lines," Proc. of 2016 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, pp. 349-352, Cairns, Australia, 2016.

⑬ H. N. Quang and H. Shirai, "A Compact D-CRLH Metamaterial Antenna for WLAN and WiMAX Multiband," Proc. of 2016 International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 32-33, Okinawa, Japan, 2016.

⑭ K. Fujita and H. Shirai, "Radiation Efficiency of Multi-arm Open-ended Spherical Helix Antennas," Proc. of 2016 International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 722-723, Okinawa, Japan, 2016.

⑮ R. Sato and H. Shirai, "Electromagnetic Scattering by Simplified Crack

Models on Conducting Ground Plane," Proc. of 2016 International Symposium on Antennas and Propagation, pp.582-583, Okinawa, Japan, 2016.

⑯ R. Sato and H. Shirai, "Efficient Approximate Solution of Scattering Field by Three-layered Dielectric Slab for Accurate Propagation Analysis," Proc. of 2017 International Conference on Computational Electromagnetics, CDROM, Kumamoto, Japan, 2017.

⑰ H. B. Chu and H. Shirai, "Design of Multiband Antennas Using Asymmetric E-CRLH TL unit cells," Proc. of 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, pp.2531-2532, San Diego, USA, 2017.

⑱ H. N. Quang and H. Shirai, "High Frequency Plane Wave Scattering Analysis from Dielectric Cuboids -TM Polarization-," Proc. of 2017 URSI General Assembly and Scientific Symposium, CDROM, Montreal, Canada, 2017.

⑲ K. N. Nguyen and H. Shirai, "Electromagnetic Plane Wave Scattering by a Rectangular Hole in a Thick Conducting Screen," Proc. of 2017 International Conference on Electromagnetics and Advanced Applications, CDROM Verona, Italy, 2017.

⑳ R. Sato and H. Shirai, "High-frequency Asymptotic Solution of Scattering Field by Three-layered Dielectric Slab for Accurate Propagation Analysis," Proc. of 2017 International Symposium on Antennas and Propagation, CDROM, Phuket, Thailand, 2017.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：球面ヘリカルアンテナ，発明者：白井宏，藤田 佳祐，権利者：学校法人中央大学，種類：特許権，番号：特願 2016-163943，出願年月日：2016 年 8 月 24 日，国内外の別：国内のみ

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

以下のホームページ：

<http://www.elect.chuo-u.ac.jp/shirai/>

に研究業績を含めた研究紹介を掲載している。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白井 宏 (SHIRAI, Hiroshi)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：00196594

(2) 研究分担者

佐藤 亮一 (SATO, Ryoichi)

新潟大学・人文社会・教育科学系・教授

研究者番号：00293184